

Fotonika w systemach teleinformatycznych nowych generacji

Paweł Szczepański

Omówiono wybrane aspekty związane z rozwojem badań nad przyrządami i zintegrowanymi systemami fonicznymi, przeznaczonymi w szczególności do współpracy z przezroczystymi sieciami optycznymi nowych generacji, transmisją i przetwarzaniem danych.

fotonika, kryształy foniczne, krzemowe podzespoły

Wprowadzenie

Od tysięcy lat światło było wykorzystywane do komunikacji między ludźmi na duże odległości. W czasach starożytnych najszybsze metody przekazywania informacji polegały na wykorzystaniu sygnałów dymnych. Kolejne wieki przynosiły różne rozwiązania, zmierzające do udoskonalania systemów optycznej komunikacji. Jednak prawdziwy postęp w tej dziedzinie wiedzy rozpoczął się na przełomie XVIII i XIX wieku, kiedy to w 1791 r. Chappe zademonstrował system sygnalizacyjny, którego podstawowym elementem była zainstalowana na słupie para ruchomych ramion. Wynalazek ten zapoczątkował rozwój złożonych sieci „telekomunikacyjnych”, tworzonych przez semafore, umożliwiające przekazywanie informacji na duże odległości. W XIX wieku pojawiły się kolejne rozwiązania, m.in. w Algierii powstał system łączności optycznej oparty na zwierciadlanym heliografie, wynalezionym przez Julesa Leseurre w 1855 r. Heliograf był utworzony przez system dwóch zwierciadeł, jednego ogniskującego promienie słoneczne oraz drugiego formującego wiązkę kierunkową (wyjściową), przedzielonych migawką. W 1880 r. pojawiło się nowe urządzenie, zaprojektowane przez Alexandra Grahama Bella, tzw. fotofon, w którym sygnał głosowy naniesiony na wiązkę optyczną mógł być transmitowany i odbierany przez elektryczny odbiornik.

Jednocześnie John Tyndall w 1854 r. pokazał, że jest możliwe poprowadzenie światła w wygiętej strudze wody. W podobnym czasie pomysł wykorzystania systemu rur ze zwierciadłami do rozprzeczania światła z centralnego źródła, w celu oświetlania wnętrza budynku, został zaproponowany przez Wheelera. Jednak prawdziwy rozwój technik światłowodowych nastąpił dopiero na początku lat 70. XX wieku. Propozycja wykorzystania włókna światłowodowego do prowadzenia fali świetlnej, jako alternatywnego sposobu prowadzenia wiązki, zastępującego system ogniskujących soczewek, została przedstawiona w 1966 r., dając początek dynamicznemu rozwojowi technik światłowodowych. W 1970 r. został wyprodukowany, przez firmę Corning, szklany światłowód o stratach nie przekraczających 20 dB/km, a w 1979 r. pojawił się już na rynku pierwszy komercyjny system komunikacji światłowodowej.

Opanowanie technologii światłowodów o niskiej tłumienności wraz z odkryciem lasera i generacji koherentnego światła spowodowało fundamentalny przełom w systemach telekomunikacyjnych, dając podwaliny rozwoju współczesnych technologii informacyjnych.

Obecnie oczekuje się dostępu do informacji „w zasięgu ręki”, wszędzie i w dowolnej porze. Informacje są dostarczane przez globalne sieci teleinformatyczne, których współczesne rozwiązania

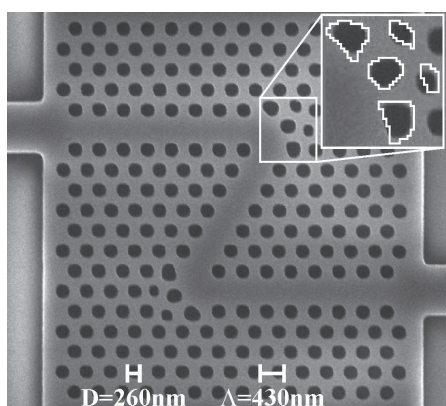
(np. internet, sieci asynchroniczne ATM (*Asynchronous Transfer Mode*), sieci IP itp.) jednak nie mają wystarczających pojemności, aby sprostać przewidywanym i wymaganym w przyszłości szybkościom transmisji danych.

Jednym z rozwiązań, które mogą zapewnić odpowiednie pasma transmisyjne, jest wykorzystanie mikro- i nanofotonicznych przyrządów oraz układów, a także technologii włókien fonicznych (włączając w to włókna nowej generacji, np. włókna mikrostrukturalne) do budowy elementów warstwy fizycznej systemów teleinformatycznych. Wynika to z ich potencjalnie nieograniczonej pojemności [1], pasm transmisji sięgających 50 Tbit/s, niskiego poboru mocy oraz małych rozmiarów. W szczególności, możliwość pułapkowania fotonów w obszarach skalowanych długością fali umożliwia rozwój technologii miniaturowych przyrządów fonicznych oraz zintegrowanych układów fonicznych wysokiej skali integracji, realizujących wszystkie funkcje, niezbędne do przetwarzania i przesyłania informacji (takie jak: generacja, detekcja, modulacja, filtrowanie, przełączanie, możliwość zapisu danych itp.).

Kryształy foniczne

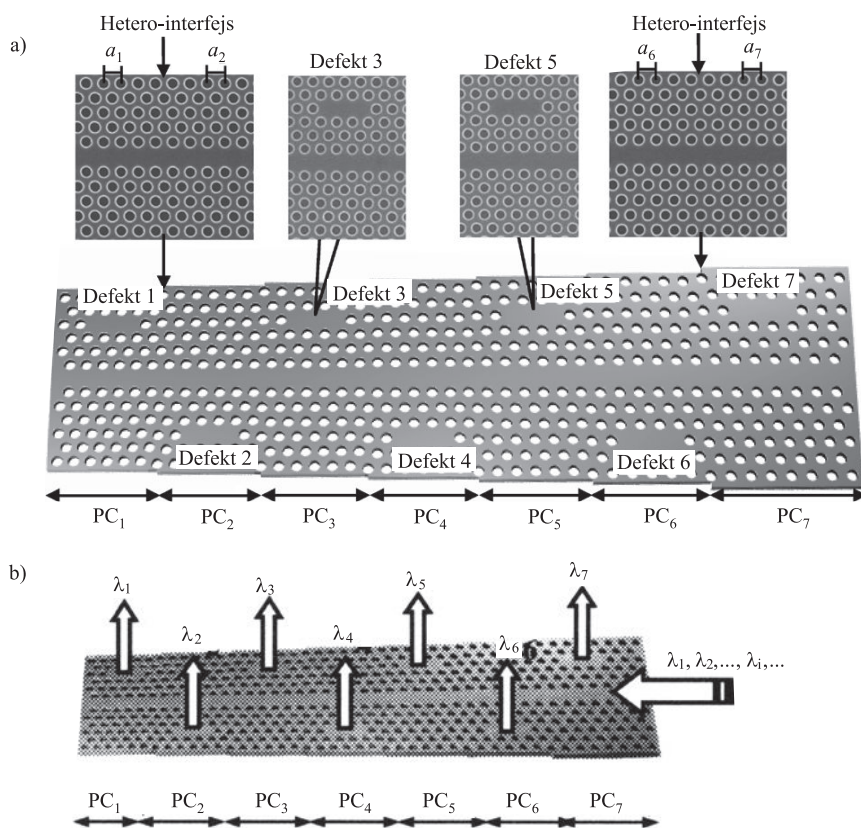
Przykładem jakościowego postępu w technologiach fonicznych jest odkrycie nowej klasy materiałów optycznych, tj. kryształów fonicznych [2]–[4]. Są to ośrodki o wprowadzonej periodycznej przestrzennej modulacji przenikalności dielektrycznej w jednym (1D), dwóch (2D) lub trzech kierunkach, tworzące odpowiednio jednowymiarowe, dwuwymiarowe oraz trójwymiarowe kryształy foniczne. Charakterystyczne dla tego typu struktur jest występowanie przerwy fonicznej, tj. pewnego pasma częstotliwości (zależnego od symetrii kryształu oraz kontrastu przenikalności dielektrycznej), w zakresie którego fale elektromagnetyczne nie mogą się propagować w kryształach. Jest to pełna analogia do występującej w materiałach półprzewodnikowych przerwy energetycznej.

Współczesny postęp mikro- i nanotechnologii umożliwia z bardzo dużą elastycznością kształtowanie unikatowych własności optycznych kryształów fonicznych przez odpowiedni dobór różnorodnych materiałów, symetrii komórki elementarnej kryształu, a także wprowadzanie defektów (zaburzenie



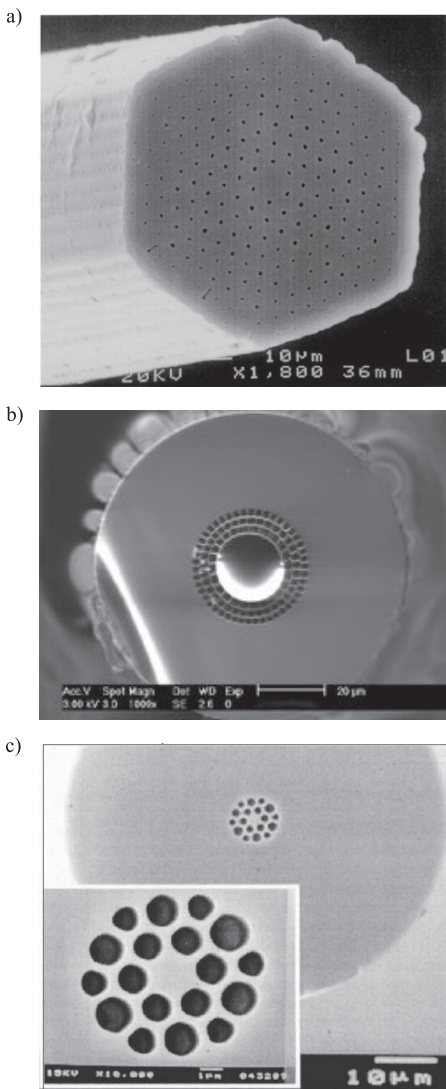
Rys. 1. Zgięcie falowodu w kształcie litery Z – obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Liczbę, kształt oraz rozmiar otworów na każdym zgięciu zaprojektowano dzięki optymalizacji topologii [źródło: P. I. Borel, A. Harpøth, L. H. Frandsen, and M. Kristensen, “Topology optimization and fabrication of photonic crystal structures”, *Opt. Exp.*, vol. 12, pp. 1996–2001, 2004.]

symetrii translacyjnych). W szczególności działania te pozwalają na praktycznie dowolne kształtowanie zależności dyspersyjnych w zadanych strukturach. Na przykład, wprowadzenie liniowych defektów do kryształu fonicznego umożliwia stworzenie falowodu (rys. 1), ponieważ pole elektromagnetyczne w zakresie częstotliwości odpowiadającym przerwie fonicznej jest lokalizowane w obszarze zaburzenia. Podobnie, wprowadzenie defektów punktowych otwiera możliwości tworzenia mikro- i nanorezonatorów o bardzo wysokich dobrociach, sięgających 200 000. Kombinacja defektów liniowych i punktowych w kryształach fonicznych daje prawie nieograniczone możliwości projektowania różnego typu elementów funkcjonalnych, takich jak na przykład bezprogowe lasery [5], multi- i demultipleksery, filtry typu Add/Drop (rys. 2) itp. Wykorzystanie materiałów optycznie nieliniowych rozszerza te możliwości o elementy przełączające. Praktycznie dowolne kształtowanie charakterystyk dyspersyjnych umożliwia również uzyskiwanie bardzo wysokich (przekraczających 1000) efektywnych współczynników załamania, a co się z tym wiąże tworzenie zminiaturyzowanych elementów optycznych o bardzo silnej dyspersji (np. superpryzmatów), a także budowę zintegrowanych układów fonicznych o wysokiej skali integracji.



Rys. 2. a) Wielokanałowy filtr do wstawiania/wydzielania kanałów w sieci WDM (Add/Drop) z siedmioma obszarami różnych kryształów fonicznych, różniących się stałą sieci między sąsiednimi obszarami o 1,25 nm. b) Odsprężanie na poszczególnych defektach [źródło: B.-S. Song, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, and S. Noda, "Multichannel Add/Drop filter based on in-plane heterophotonic crystals", *J. Lighth. Tech.*, vol. 23, pp. 1449–1455, 2005.]

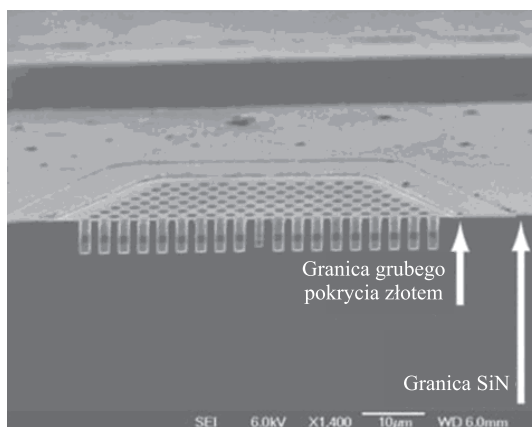
Warto też wspomnieć o alternatywnym podejściu do budowy fotonicznych systemów zintegrowanych, wykorzystujących materiały o dużym współczynniku załamania i dobrych własnościach optycznych. Umożliwia to tworzenie elementów fotonicznych o dużym kontraście współczynników załamania i tym samym lokalizację światła w małych obszarach. Obecnie są to głównie struktury wykonywane na bazie krzemu (fotonika krzemowa) oraz fosforu indu. W dalszej części artykułu zostaną omówione bardziej szczegółowo dostępne obecnie rozwiązania elementów i układów fotonicznych w technologii krzemowej.



Rys. 3. Światłowód mikrostrukturalny: a) koniec włókna [źródło: T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber", *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 961–963, 1997.]; b) ze zwierciadłem braggowskim [źródło: G. Vienne et al., "First demonstration of air-silica Bragg fiber", in *Opt. Fiber Commun. Conf. OFC 2004, Los Angeles, USA, 2004.*]; c) z rdzeniem dielektrycznym [źródło: W. J. Wadsworth, A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, T. A. Birks, T.-P. Martin Man, and P. S. J. Russell, "Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, pp. 2148–2155, 2002.]

Kryształy fotoniczne, poza strukturami planarnymi, mogą być wykonywane w formie włókien optycznych, tworząc nowy typ światłowodów, tzw. światłowody mikrostrukturalne (rys. 3). Charakteryzują się one unikatowymi własnościami (nieosiągalnymi w klasycznych włóknach), umożliwiającymi, np. propagację jednomodową w dowolnym zakresie częstotliwości, czy też prowadzenie światła w pustym rdzeniu w niezwykle szerokim pasmie częstotliwości, przekraczającym teraherce [6]–[10].

Połączenie kontroli elektronicznej w nanostrukturach (np. kropkach kwantowych) oraz kontroli fotonów w kryształach fotonicznych otwiera kolejne możliwości budowy nowych przyrządów, przeznaczonych do przetwarzania sygnałów optycznych. Na przykład, wywołanie zmiany stanu w nanostrukturze koherentnym światłem (rys. 4) daje podstawy do budowy optycznych pamięci, dynamicznych



Rys. 4. Przekrój struktury lasera, wykorzystującego kryształ fotoniczny oraz układ studni kwantowych [źródło: R. Colombelli, K. Srinivasan, M. Troccoli, O. Painter, C. Gmachl, D. M. Tennant, A. M. Sergent, D. L. Sivco, A. Y. Cho, and F. Capasso, "Fabrication technologies for quantum cascade photonic-crystal microlasers", *Nanotechnology*, vol. 15, pp. 675–681, 2004.]

przełączników, czy też optycznych ruterów nowych generacji. Podobnie, obserwowany – z udziałem wiązek o niskiej liczbie fotonów – kwantowy efekt interferencyjny (tzw. jednofotonowa optyka nieliniowa) może być wykorzystany do budowy przełączników optycznych, sterowanych wiązką świetlną [11]. Koherentna manipulacja, tzw. stanów splecionych z wykorzystaniem kropek kwantowych, nabiera realnego znaczenia dla praktycznych zastosowań algorytmów kwantowych. Obecnie są już znane działające systemy łączności optycznej, wykorzystujące kryptografię kwantową (opartą na kodowaniu z udziałem jednego fotonu) [12]–[14].

Fotonika krzemowa i technologie krzemowe dla fotoniki

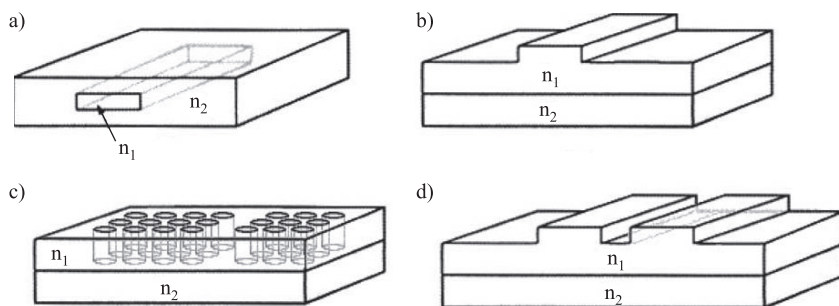
Ostatnie lata zaowocowały intensywnym rozwojem fotonicznych układów zintegrowanych, pracujących w oknie transmisji $1,55\ \mu\text{m}$. Obecnie na rynku jest dostępnych wiele przyrządów fotonicznych (tj. filtrów, modulatorów czy ruterów), które są produkowane przy użyciu różnych materiałów, np. LiNbO_3 , GaAs i InP, o znakomitych właściwościach elektrooptycznych i emisyjnych. Wykonane w tych technologiach przyrządy mogą być stosowane z powodzeniem do budowy warstwy fizycznej sieci optycznych, jako elementy dyskretne.

Budowa fotonicznych układów zintegrowanych, z kolei, jest podyktowana potrzebą przetwarzania i transmisji wielkiej liczby danych na małych (często skalowanych długością fali) przestrzeniach [15]–[20]. Przykłady takich zastosowań można znaleźć w mikroprocesorowej magistrali danych, gdzie są realizowane optyczne połączenia mikroprocesora i pamięci lub między wieloma procesorami, a także w płycie montażowej szafy serwera, gdzie optyczne łącza integrują poszczególne jednostki serwera (płyty). Zastosowania te wiążą się ze zwiększoną złożonością układów, wymagającą większej skali integracji komponentów optycznych i elektronicznych. Wydaje się więc, że budowa na jednym podłożu monolitycznych systemów optycznych i elektronicznych jest naturalnym kierunkiem rozwoju tego typu układów, podobnie jak wykorzystanie w tym celu technologii krzemowych [20]–[23].

Idea fotoniki opartej na krzemie została zaproponowana w latach 80. [24], jednak dopiero postęp technologiczny ostatniej dekady otworzył możliwości wytworzenia struktur fotonicznych o rozmiarach submikronowych [21]. Postęp ten umożliwia bowiem pokonywanie ograniczeń wynikających z własności optycznych krzemu, a w szczególności charakterystycznego dla tego materiału niskiego współczynnika elektrooptycznego oraz małej wydajności emisji światła.

Podzespoły pasywne

Obecny stan zaawansowania technologii krzemowej pozwala na wytwarzanie światłowodów, charakteryzujących się stratami propagacji mniejszymi niż 3 dB/cm [25], [26]. W ogólności, straty te pochodzą z trzech głównych źródeł: sprzężenia do modów radiacyjnych, wewnętrznej absorpcji w materiale oraz rozpraszania spowodowanego nierównościami powierzchni faliowodów. W przypadku długości fali ok. $1,55\ \mu\text{m}$ straty spowodowane wewnętrzną absorpcją – zarówno w Si, jak i SiO_2 – mogą być pominięte [27] wobec strat spowodowanych radiacją modów i rozproszeniem światła.

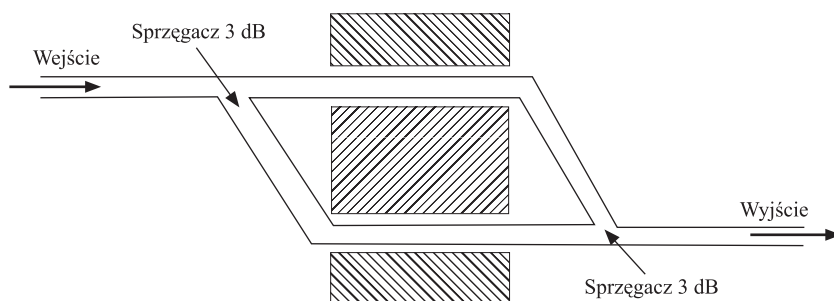


Rys. 5. Konfiguracje faliowodów w strukturach krzemowych: a) faliwód zagrzebany; b) faliwód grzbietowy; c) faliwód fotoniczny; d) faliwód szczelinowy [źródło: M. Lipson, "Guiding, modulating, and emitting light on silicon – challenges and opportunities", *J. Lightw. Technol.*, vol. 23, no. 12, pp. 4222–4283, 2005.]

Na rys. 5 pokazano typowe konfiguracje faliowodów wytwarzanych w technologii krzemowej. W faliowodach kanałowych (zagrzebanych) i grzbietowych propagacja fali odbywa się na zasadzie klasycznego całkowitego wewnętrznego odbicia, gdzie światło jest prowadzone w obszarze o wyższym współczynniku załamania. Ponadto, ze względu na łatwość uzyskiwania w technologii krzemowej wysokich kontrastów współczynnika załamania (w przeciwieństwie do materiałów szklanych), pojawia się możliwość wytwarzania innych nowoczesnych typów faliowodów, gdzie światło może być zamknięte w obszarach o niskim wskaźniku refrakcji (jak powietrze). Są to faliowody (rys. 5c)

o strukturze kryształu fonicznego i falowody szczelinowe (rys. 5d). W pierwszym typie światłowodów ograniczenie fali elektromagnetycznej wynika z istnienia przerwy fonicznej w kryształach. W drugim przypadku, na skutek dużej różnicy współczynników załamania, na granicy szczeliny powstają mody o wysokiej intensywności, które – w wyniku wzajemnego przestrzennego nakładania się – formują mod w obszarze szczeliny, mający większą intensywność niż pole w obszarach o wyższym współczynniku załamania. Z danych eksperymentalnych wynika [28], że stosując te struktury, można zlokalizować światło w obszarach o małym współczynniku załamania i rozmiarach ok. 50 nm.

Falowody kanałowe i grzbietowe (grzebieniowe) użyto do budowy bardziej skomplikowanych przyrządów pasywnych, np. filtrów wykorzystujących działanie interferometru (Macha-Zehndera), wielomodowych sprzęgaczy interferencyjnych, jak również multiplekserów. Warto zaznaczyć, że foniczne przyrządy pasywne, wykonane w planarnej technologii krzemowej, stają się konkurencyjne – z punktu widzenia ekonomicznego – dla urządzeń o podobnej funkcjonalności, wykonanych na bazie włókien optycznych oraz klasycznych falowodów tlenkowych. Ponadto, technologia ta umożliwia wykonanie układów na „chipie”, włączając w to realizację szerokopasmowych połączeń optycznych.

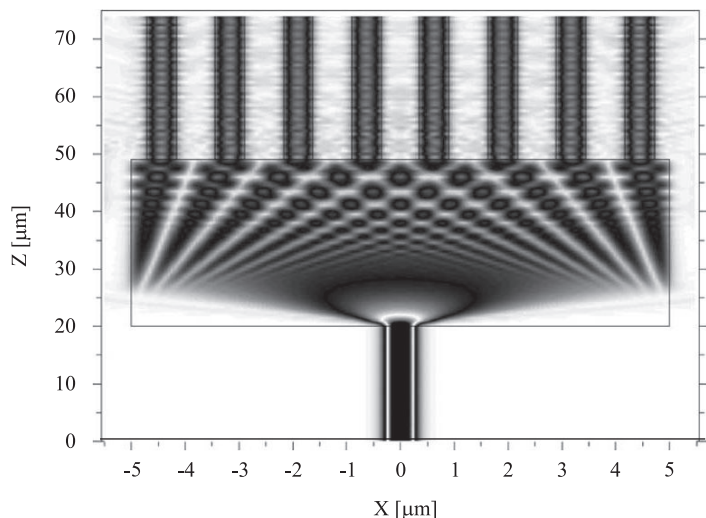


Rys. 6. Interferometr Macha-Zehndera [29]

Na rys. 6 przedstawiono w sposób schematyczny interferometr Macha-Zehndera, utworzony z dwóch połączonych ze sobą złączy typu Y. Pierwsze złącze na wejściu dzieli sygnał wejściowy na dwie równe wiązki, ponownie sprzęgane w złączu drugim i interferujące ze sobą. W zależności od uzyskanego przesunięcia fazowego wiązka na wyjściu może mieć amplitudę zerową (interferencja destruktywna) bądź maksymalną (interferencja konstruktywna). Ponieważ przesunięcie fazy jest zależne od długości fali, przyrząd ten może realizować funkcję filtru długości fali [29].

Na rys. 7 zaprezentowano działanie interferencyjnego sprzęgacza N-kanałowego, w którym sygnał wejściowy jest wprowadzany przez jednomodowy falowód do ośrodka objętościowego, gdzie może się propagować wiele modów o różnych prędkościach fazowych. To powoduje, że w ośrodku tym pojawiają się prążki interferencyjne (tj. obszary o dużym i małym natężeniu fali). Ustawienie falowodów wyjściowych w miejscach dużego natężenia pozwala na odprężenie fali i wyprowadzenie sygnałów wieloma światłowodami.

Podstawowym i najbardziej popularnym elementem optycznych torów telekomunikacyjnych opartych na technice WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) jest multiplekser, umożliwiający zarówno łączenie, jak i separację przestrzenną fal o różnych długościach, stanowiących nośne dla niezależnych kanałów. Multiplekser zazwyczaj wykorzystuje siatkę Bragga, w której odbicie fali bardzo silnie zależy od jej długości. Działanie takiego multipleksera, wykonanego w technologii krzemowej,



Rys. 7. Symulacja działania sprzęgacza optycznego 1×8 MMI (Multimode Interference)
[źródła: [26] oraz C. Pollock and M. Lipson, *Integrated Photonics*. Boston: Kluwer, 2003.]

w którym uzyskano odstęp między kanałami równy $0,12 \text{ nm}$, opisano w [30]. Inny typ multiplexera wykorzystuje kaskadę rezonatorów pierścieniowych sprzęgniętych z dwoma torami światłowodowymi, gdzie jeden z nich pełni rolę magistrali, drugi natomiast transmituje sygnał o zadanej długości fali. Rezonatory, z kolei, umożliwiają sprzężenie między torami falowodowymi dla fal o określonych długościach [31].

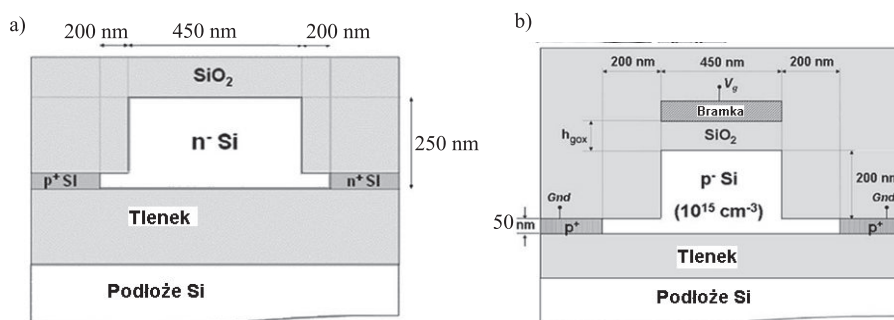
Przyrządy o podobnych funkcjach zostały również wytworzone w technologiach krzemowych na bazie kryształów fotonicznych [32], [33].

Modulatory promieniowania

Podobnie dynamiczny postęp jest obserwowany w grupie aktywnych fotonicznych przyrządów krzemowych, tj. modulatorów, wzmacniaczy oraz źródeł światła. Na przykład, są już dostępne modulatory elektrooptyczne o pasmach modulacji przekraczających 10 GHz [34], [35] i rozmiarach zaledwie kilku mikrometrów [36]. W szczególności w popularnych rozwiązaniach konstrukcyjnych modulatorów jest ponownie wykorzystywany interferometr Macha-Zehndera. Tym razem w jednym z jego ramion jest realizowane kontrolowane przesunięcie fazy, wynikające ze zmiany współczynnika załamania spowodowanej przyłożonym napięciem (efekt elektrooptyczny). Zaletą tego rozwiązania jest mała czułość na zmiany temperatury [29], które w przypadku krzemu w standardowych rozwiązaniach powodują nieznaczne przesunięcia fazy (zmiany współczynnika załamania wynoszą $2 \cdot 10^{-4}/\text{K}$, a zatem w standardowych rozwiązaniach przesunięcie fazy jest mniejsze niż 1° w przypadku zmian temperatury o 10°C).

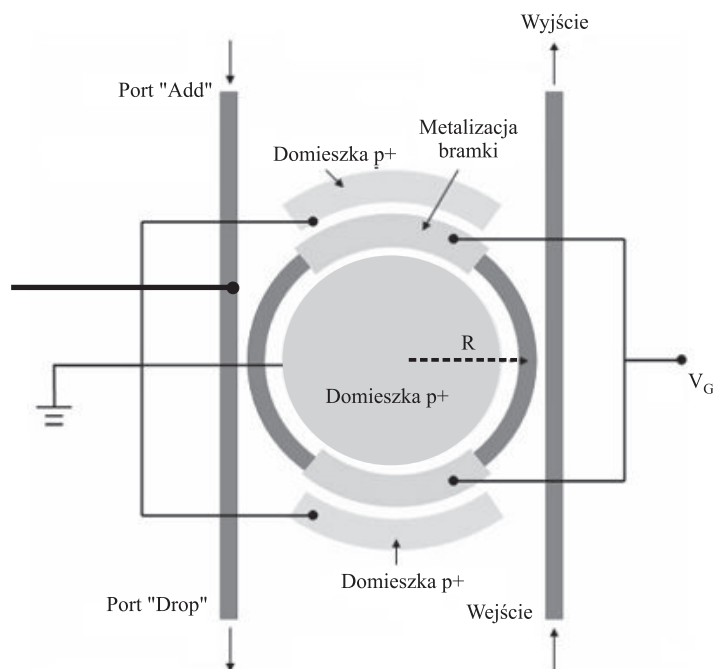
Alternatywnym rozwiązaniem modulacji optycznej jest wykorzystanie mikrorezonatorów, w których transmisja dla zadanej długości fali zależy od długości optycznej. Wykorzystując efekt elektrooptyczny i zmianę współczynnika załamania pod wpływem przyłożonego napięcia, można zmieniać w sposób kontrolowany długość optyczną i tym samym transmisję mikrorezonatora. Rozwiązanie to doczekało się wielu realizacji praktycznych.

Warto dodać, że jednym z wygodnych sposobów zmian współczynnika załamania w kanałach krzemowych jest wykorzystanie diody PIN. Struktury falowodowe z wbudowaną diodą typu PIN przedstawiono na rys. 8a. Wytworzone w strukturze złącze p-n umożliwia, w zależności od stanu



Rys. 8. Przekrój poprzeczny falowodu grzbietowego: a) ze zintegrowanym złączem p-i-n odpowiedzialnym za modulację elektrooptyczną; b) ze zintegrowaną strukturą MOS odpowiedzialną za modulację elektrooptyczną [źródło: C. A. Barrios, V. R. Almeida, and M. Lipson, "Electrooptic modulation of silicon-on-insulator submicrometer-size waveguide devices", *J. Lightw. Technol.*, vol. 21, no. 10, pp. 2332–2339, Oct. 2003.]

polaryzacji, kontrolę gęstości nośników w obrębie falowodu i tym samym kontrolę zmian współczynnika załamania dla różnych typów rezonatorów [31]–[33]. Bardziej zaawansowane rozwiązania opierają się na efekcie tranzystorów MOS (rys. 8b), w których przepływ nośników, zmieniający współczynnik



Rys. 9. Modulator optyczny, wykorzystujący strukturę MOS w konfiguracji rezonatora pierścieniowego [34]

załamania w krzemie, jest sterowany napięciem bramki. Wykorzystanie struktur MOS (*Metal-Oxide-Semiconductor*) [34], [37] w konfiguracji rezonatora pierścieniowego (rys. 9) otworzyło nowe możliwości budowy modulatorów o pasmie modulacji przekraczającym 200 GHz.

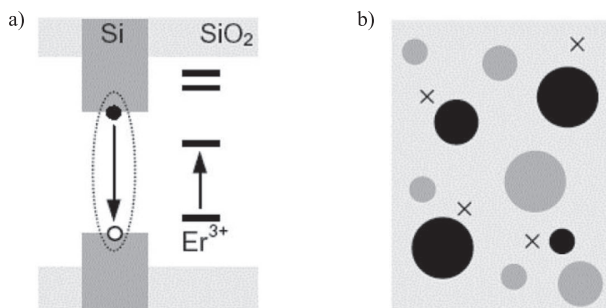
Źródła promieniowania

Uzyskanie emisji i wzmocnienia światła w krzemie stanowi jedno z głównych wyzwań, stojących przed fotoniką krzemową. Bardzo niska wydajność luminescencyjna w tym materiale (w porównaniu, np. z materiałami półprzewodnikowymi grupy III-V, tj. GaAs, InP itd.) wynika ze skośnej przerwy energetycznej, utrudniającej rekombinację promienistą, wymagającą w tym przypadku asysty fononu, jak również silnej konkurencji spowodowanej rekombinacją niepromienistą. W wyniku badań wskazano jednak kilka propozycji wykorzystania krzemu do generacji fotonów.

Pierwsza propozycja polega na domieszkowaniu krzemu jonami erbu (Er:Si) [38]. W tym przypadku, ze względu na stosunkowo szeroką przerwę energetyczną obserwowaną w krzemie oraz położenie poziomów energetycznych jonu erbu w kryształ krzemu (stanowiącym osnowę), pojawiła się możliwość rekombinacji nośników z udziałem poziomów energetycznych erbu, której towarzyszy emisja fotonów.

W innym rozwiązaniu, umożliwiającym również emisję fotonów w wyniku przepływającego przez krzem prądu, wykorzystano efekt silnego przestrzennego ograniczenia nośników w nanokrystalitach krzemowych (Si-nc) [39] wykonanych w krzemie, prowadzącego do efektu kwantowego. W wyniku tego ograniczenia w obszarze nanokrystalitów otrzymano zupełnie inną strukturę energetyczną niż dla krzemu objętościowego, umożliwiającą rekombinację promienistą i emisję fotonów. Zaproponowano kilka sposobów uzyskiwania nanokrystalitów [40]–[44] z kontrolą ich rozmiarów. Uzyskiwane długości fali w tego typu strukturach wypadają jednak w obszarze widzialnym, co sprawia, że promieniowanie jest chętnie pochłaniane przez krzem, a to stanowi podstawową przeszkodę integracji. Ponadto, przy wyższych poziomach wstrzykiwania (z większą liczbą par elektron-dziura przypadających na jeden nanokrystalit) proces rekombinacji niepromienistej Augera prowadzi do silnego nasycenia luminescencji.

Ostatnie lata przyniosły próby łączenia technologii nanokrystalitów z domieszkowaniem erbem [45]–[51]. Okazało się, że świecenie luminescencyjne w nanokrystalitach krzemowych domieszkowanych erbem może mieć charakter elektroluminescencyjny. Mechanizm wzbudzenia [48] wiąże się tu z powstaniem ekscytynu (związanej pary elektron-dziura generowanej w tym przypadku



Rys. 10. a) Model ekscytonowy erbu, pokazujący strukturę pasm nanokrystalitów Si w osnowie SiO₂ i poziomy Er 4f. Optycznie wygenerowany ekscyton (linia kropkowana) zlokalizowany w nanokrystalie może rekombinować i wzbudzać Er³⁺. b) Schemat matrycy SiO₂, zawierającej atomy Er (krzyżyki) oraz nanokrystały (kółka) [51]

przez głęboki poziom pułapkowy), a następnie jego rekombinację i oddanie energii w procesie Augera do jonu erbu (rys. 10). W ten sposób wzbudzony jon erbu, rekombinując, jest zdolny wyemitować foton o długości fali $1,5\ \mu\text{m}$. Uzyskana w ten sposób luminescencja zanika jednak silnie wraz ze wzrostem temperatury, co jest związane z rozpadem ekscytonów (zmniejszeniem ich gęstości) oraz wzrostem prawdopodobieństwa wstecznego procesu transferu energii, tj. od jonu erbu do stanu pułapkowego.

Poza wzbudzeniem elektrooptycznym zaproponowano również inny schemat generacji promieniowania w krzemie, wykorzystujący pompowanie optyczne oraz wymuszony efekt Ramana [52], który polega na oddziaływaniu fali elektromagnetycznej z drganiami sieci krystalicznej krzemu. W efekcie oddziaływania pojawia się foton o niższej (w stosunku do wiązki pompującej) energii (tzw. stokesowski) oraz foton o energii wyższej (tzw. antystokesowski), którego prawdopodobieństwo generacji jest o wiele mniejsze. W przypadku obecności sygnału pompy oraz sygnału stokesowskiego, w materiale jest możliwe uzyskanie koherentnego wzmocnienia sygnału stokesowskiego – jest to tzw. zjawisko wymuszonego rozpraszania Ramana. Warto zaznaczyć, że wydajność procesu wymuszonego rozpraszania w krzemie jest trzy rzędy wielkości wyższa niż w SiO_2 .

Podstawową przeszkodą do uzyskania wysokiego wzmocnienia sygnału stokesowskiego w krzemie jest rozpraszanie fali elektromagnetycznej na swobodnych nośnikach, generowanych w wyniku dwufotonowej absorpcji promieniowania pompującego. Skutecznym sposobem przeciwdziałania temu zjawisku było wykorzystanie diody typu PIN wbudowanej do światłowodu grzbietowego wykonanego w technice SOI (*Silicon-on-Insulator*). Zadaniem diody spolaryzowanej zaporowo jest usunięcie fotonosników z obszaru falowodu i obniżenie strat wynikających z rozpraszania. W wykonanej w ten sposób zintegrowanej strukturze laserowej, pompowanej laserem diodowym z InP, udało się uzyskać generację promieniowania koherentnego na jednym, stabilnym modzie o szerokości 80 MHz [53]–[56].

Rozwój fotoniki krzemowej zależy od dalszych badań przyrządów oraz od postępów w opracowywaniu technologii. Na przykład, straty propagacyjne w falowodach zostały w ostatnich latach znacznie zredukowane, jednak dalsze ich obniżenie poniżej 1 dB/cm w falowodach małowymiarowych wymaga starannego określenia źródła ich powstawania. Konieczne jest również podjęcie badań nad podniesieniem odporności przyrządów na zmiany temperatury oraz znalezienie skutecznego sposobu izolacji termicznej układów optycznych i elektronicznych. Problem ten jest szczególnie ważny w przypadku integracji układów fotonicznych z układami elektronicznymi, wykonanymi też w technologii krzemowej. Jednak obserwowany w ostatnich latach dynamiczny postęp w wytwarzaniu funkcjonalnych przyrządów fotoniki krzemowej, charakteryzujących się bardzo małymi wymiarami, niskim poborem mocy, możliwościami przetwarzania informacji i szybkościami sięgającymi 100 Gbit/s, pozwala oczekiwać w niedalekiej przyszłości pojawienia się komercyjnych rozwiązań zintegrowanych systemów wykonanych w technologii krzemowej.

Podsumowanie

Obserwowany w ostatnich latach niezwykle dynamiczny rozwój mikro- i nanofotoniki umożliwił przesyłanie i przetwarzanie informacji z niespotykanymi do tej pory szybkościami. W szczególności możliwość pułapkowania i prowadzenia fotonów w obszarach o rozmiarach porównywalnych z długością fali doprowadziła do znaczącego przełomu w projektowaniu i konstrukcji miniaturowych przyrządów fotonicznych, realizujących różne funkcje, niezbędne do wzbudzenia, detekcji, prowadzenia, modulacji, pamiętania i przetwarzania sygnałów optycznych. Zapoczątkowało to budowę zintegrowanych układów fotonicznych o dużej skali integracji, umożliwiających rozwiązywanie problemów związanych z koniecznością przetwarzania wielkiej liczby danych, charakteryzujących

współczesne sieci teleinformatyczne. Podobnie opanowanie technologii światłowodów optycznych o bardzo niskiej tłumienności dało początek globalnym sieciom optycznym o pojemnościach przekraczających 100 Gbit/s.

Dalszy rozwój technologii fonicznych i ich wykorzystanie w sieciach teleinformatycznych następnych generacji zależy od stworzenia płaszczyzny technologicznej do wytwarzania komercyjnych fonicznych systemów zintegrowanych o wysokiej skali integracji, a także od kwestii podziału funkcjonalności realizowanych w warstwach (optycznej i elektronicznej) układów zintegrowanych.

Bibliografia

- [1] B. Mukherjee, "WDM optical communication networks: progress and challenges", *J. Selec. Areas Commun.*, vol. 18, pp. 1810–1824, Oct. 2000.
- [2] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*. Princeton: Princeton University Press, 1995.
- [3] J.-M. Lourtioz, H. Bensity, V. Berger, J.-M. Gerard, D. Maystre, and A. Tchebnokov, *Photonic Crystals Towards Nanoscale Photonic Devices*. Berlin: Springer, 2005.
- [4] K. Busch, S. Lölkes, R. B. Wehrspohn, and H. Föll, *Photonic Crystals Advances in Design, Fabrication, and Characterization*. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [5] K. Nozaki *et al.*, "Room temperature continuous wave operation and controlled spontaneous emission in ultrasmall photonic crystal nanolaser", *Opt. Expr.*, vol. 15, no. 12, p. 7506, 2007.
- [6] F. Zolla, G. Renversez, A. Nicolet, B. Kuhlmeier, S. Guenneau, and D. Felbacq, *Foundations of Photonic Crystal Fibers*. London: Imperial College Press, 2005.
- [7] A. Bjarklev, J. Broeng, and A. S. Bjarklev, *Photonic Crystal Fibers*. Berlin: Springer, 2003.
- [8] N. Fukaya, D. Ohsaki, and T. Baba, "Two-dimensional photonic crystal waveguides with 60 bends in a thin slab structures", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 2619–2623, 2000.
- [9] K. Srinivasan, O. Painter, R. Colombelli, C. Gmachl, D. M. Tennant, A. M. Sergent, D. L. Sivco, A. Y. Cho, M. Troccoli, and F. Capasso, "Lasing mode pattern of a quantum cascade photonic crystal surface-emitting microcavity laser", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 4164–4166, 2004.
- [10] B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, and A. Hale, "Microstructured optical fiber devices", *Opt. Expr.*, vol. 9, pp. 698–713, 2001.
- [11] K. J. Resch, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, "Nonlinear optics with less than one photon", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 87, p. 123603, 2001.
- [12] G. Chen, N. H. Bonadeo, D. G. Steel, D. Gammon, D. S. Katzer, D. Park, and L. J. Sham, "Optically induced entanglement of excitons in a single quantum dot", *Science*, vol. 289, pp. 1906–1909, 2000.
- [13] P. Michler, A. Imamolu, M. D. Mason, P. J. Carson, G. F. Strouse, and S. K. Buratto, "Quantum correlation among photons from a single quantum dot at room temperature", *Nature*, vol. 406, pp. 968–970, 2000.
- [14] Ch. H. Bennett, F. Bessette, G. Brassard, L. Salvail, and J. Smolin, "Experimental quantum cryptography", *J. Cryptol.*, vol. 5, pp. 3–28, 1992.
- [15] D. A. B. Miller, "Optical interconnects to silicon", *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1312–1317, Nov./Dec. 2000.
- [16] J. D. Meindl *et al.*, "Interconnect opportunities for gigascale integration", *IBM J. Res. Develop.*, vol. 46, no. 2/3, pp. 245–263, March/May 2002.

- [17] E. M. Mohammed *et al.*, "Optical I/O technology for digital VLSI", in *Proc. SPIE*, San Jose, USA, 2004, vol. 5358, pp. 60–70.
- [18] O. Kibar, D. A. Van Blerkom, C. Fan, and S. C. Esener, "Power minimization and technology comparisons for digital free-space optoelectronic interconnections", *J. Lightw. Technol.*, vol. 17, no. 4, pp. 546–555, Apr. 1999.
- [19] A. M. Pappu and A. B. Apsel, "Analysis of intrachip electrical and optical fanout", *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 30, p. 6361, Oct. 2005.
- [20] M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, and M. Paniccia, "Silicon photonics", *Intel Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 1442, 2004.
- [21] R. C. Johnson, "Intel reveals long-term goals for silicon photonics, sensors", *Electron. Eng. Times*, 2002 [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/semi/news/OEG20020228S0033>
- [22] L. C. Kimerling, "Photons to the rescue: microelectronics becomes microphotonics", *Electrochem. Soc. Interface*, vol. 9, no. 2, p. 28, 2000.
- [23] C. Gunn, "CMOS photonics-SOI learns a new trick", in *Proc. IEEE Silicon on Insulator (SOI) Conf.*, Honolulu, USA, 2005.
- [24] R. Soref and J. Lorenzo, "All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$ ", *IEEE J. Quant. Electron.*, vol. QE-22, no. 6, pp. 873–879, June 1986.
- [25] Y. A. Vlasov and S. J. McNab, "Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends", *Opt. Expr.*, vol. 12, no. 8, pp. 1622–1631, Apr. 2004.
- [26] K. K. Lee, "Transmission and routing of optical signals in onchip waveguides for silicon microphotonics", Ph.D. dissertation, Dept. Materials Science Eng., Mass. Inst. Technol., Cambridge, USA, 2001.
- [27] K. K. Lee, D. R. Lim, H.-C. Luan, A. Agarwal, J. Foresi, and L. C. Kimerling, "Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO₂ waveguide: experiments and model", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 11, pp. 1617–1619, Sept. 2000.
- [28] Q. Xu, V. R. Almeida, and M. Lipson, "Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material", *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 14, pp. 1626–1628, July 2004.
- [29] P. D. Trinh, S. Yegnanarayanan, and B. Jalali, "Guided-wave optical circuits in silicon-on-insulator technology", in *Proc. Tech. Dig. Integr. Phot. Res. Conf.*, Boston, USA, 1996, vol. 6, pp. 273–277.
- [30] T. E. Murphy, J. T. Hastings, and H. I. Smith, "Fabrication and characterization of narrow-band Bragg-reflection filters in silicon-on-insulator ridge waveguides", *J. Lightw. Technol.*, vol. 19, no. 12, pp. 1938–1942, Dec. 2001.
- [31] D. R. Lim, B. E. Little, K. K. Lee, M. Morse, H. H. Fujimoto, H. A. Haus, and L. C. Kimerling, "Micron-sized channel dropping filters using silicon waveguide devices", in *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, Boston, USA, 1999, vol. 3847, pp. 65–71.
- [32] J. S. Foresi, P. R. Villeneuve, J. Ferrera, E. R. Thoen, G. Steinmeyer, S. Fan, J. D. Joannopoulos, L. C. Kimerling, H. I. Smith, and E. P. Ippen, "Photonic-bandgap microcavities in optical waveguides", *Nature*, vol. 390, no. 6656, pp. 143–145, Nov. 1997.
- [33] T. Yoshie *et al.*, "High quality two-dimensional photonic crystal slab cavities", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 26, pp. 4289–4291, Dec. 2001.

- [34] A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu, and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulation based on a metal-oxide-semiconductor capacitor", *Nature*, vol. 427, no. 6975, pp. 615–618, Feb. 2004.
- [35] L. Liao, D. Samara-Rubio, M. Morse, A. Liu, D. Hodge, D. Rubin, U. D. Keil, and T. Franck, "High speed silicon Mach-Zehnder", *Opt. Expr.*, vol. 13, no. 8, pp. 3129–3135, Apr. 2005.
- [36] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometer-scale silicon electro-optic modulator", *Nature*, no. 435, pp. 325–327, May 2005.
- [37] C. Barrios and M. Lipson, "Modeling and analysis of high-speed electrooptic modulation in high confinement silicon waveguides using metal-oxide-semiconductor configuration", *J. Appl. Phys.*, vol. 96, no. 11, pp. 6008–6015, Dec. 2004.
- [38] S. Ossicini, L. Pavesi, and F. Priolo, *Light Emitting Silicon for Microphotonics*. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [39] L. Pavesi, L. DalNegro, C. Mazzoleni, G. Franzò, and F. Priolo, "Optical gain in silicon nanocrystals", *Nature*, vol. 408, no. 6811, pp. 440–444, Nov. 2000.
- [40] *Silicon Based Microphotonics: From Basics to Applications*, O. Bisi, S. U. Campisano, L. Pavesi, and F. Priolo, Eds. Amsterdam: IOS, 1999.
- [41] M. H. Nayfeh, N. Barry, J. Therrien, O. Akcikir, E. Gratton, and G. Belomoin, "Stimulated blue emission in reconstituted films of ultrasmall silicon nanoparticles", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 8, pp. 1131–1133, Feb. 2001.
- [42] F. G. Grom, P. M. Fauchet, L. Tsybeskov, J. P. McCaffrey, H. J. Labbe, D. J. Lockwood, and B. E. White, "Microcrystalline and nanocrystalline semiconductors – 2000", in *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.*, Boston, USA, 2001, vol. 638, pp. F6.1.1–F6.1.6.
- [43] F. Iacona, G. Franzò, and C. Spinella, "Correlation between luminescence and structural properties of Si nanocrystals", *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 3, pp. 1295–1303, Feb. 2000.
- [44] P. M. Fauchet, J. Ruan, H. Chen, L. Pavesi, L. Dal Negro, M. Cazzanelli, R. G. Elliman, N. Smith, M. Samoc, and B. Luther-Davies, "Optical gain in different silicon nanocrystal systems", *Opt. Mater.*, vol. 27, no. 5, pp. 745–749, Feb. 2005.
- [45] R. Serna, J. H. Shin, M. Lohmeier, E. Vlieg, A. Polman, and P. F. A. Alkemade, "Incorporation and optical activation of erbium in silicon using molecular beam epitaxy", *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 5, pp. 2658–2662, March 1996.
- [46] P. N. Favennec, H. l'Haridon, D. Moutonnet, M. Salvi, and M. Gauneau, "Optical activation of Er^{3+} implanted in silicon by oxygen impurities", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 29, no. 4, pp. L524–L526, Apr. 1990.
- [47] J. Michel, J. L. Benton, R. F. Ferrante, D. C. Jacobson, D. G. Eaglesham, E. A. Fitzgerald, Y.-H. Xie, J. M. Poate, and L. C. Kimerling, "Impurity enhancement of the $1.54\text{-}\mu\text{m}$ Er^{3+} luminescence in silicon", *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 5, pp. 2672–2678, Sept. 1991.
- [48] F. Priolo, G. Franzò, S. Coffa, and A. Carnera, "Excitation and nonradiative deexcitation processes of Er^{3+} in crystalline Si", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 57, no. 8, pp. 4443–4455, Feb. 1998.
- [49] S. Coffa, G. Franzò, F. Priolo, A. Polman, and R. Serna, "Temperature dependence and quenching processes of the intra-4f luminescence of Er in crystalline Si", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 49, no. 23, pp. 16313–16320, June 1994.

- [50] T. Gregorkiewicz, D. T. X. Thao, J. M. Langer, H. H. P. T. Bekman, M. S. Bresler, J. Michel, and L. C. Kimerling, "Energy transfer between shallow centers and rare-earth ion cores: Er^{3+} ion in silicon", *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 61, no. 8, pp. 5369–5375, Feb. 2000.
- [51] P. G. Kik, "Energy transfer in erbium doped optical waveguides based on silicon", Ph.D. dissertation, Nanophysics Dept., FOM-Inst. Atomic and Molecular Phys., Amsterdam, The Netherlands, 2000.
- [52] R. Boyd, *Nonlinear Optics*, 2nd ed. San Diego: Academic, 2003.
- [53] R. Clap, D. Dimitropoulos, V. Raghunathan, Y. Han, and B. Jalali, "Observation of stimulated Raman amplification in silicon waveguides", *Opt. Expr.*, vol. 11, no. 5, pp. 1731–1739, July 2003.
- [54] T. K. Liang and H. K. Tsang, "Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 15, pp. 2745–2747, Apr. 2004.
- [55] R. L. Espinola, J. I. Dadap, R. M. Osgood, Jr., S. J. McNab, and Y. A. Vlasov, "Raman amplification in ultrasmall silicon-on-insulator wire waveguides", *Opt. Expr.*, vol. 12, no. 16, pp. 3713–3718, Aug. 2004.
- [56] Q. Xu, V. R. Almeida, and M. Lipson, "Time-resolved study of Raman gain in highly confined silicon-on-insulator waveguides", *Opt. Expr.*, vol. 12, no. 19, pp. 4437–4442, Sept. 2004.

Paweł Szczepański



Prof. dr hab. inż. Paweł Szczepański (1957) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1981); wykładowca akademicki i pracownik naukowy Politechniki Warszawskiej (od 1981), dyrektor Instytutu Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej (od 2008); pracownik naukowy Instytutu Łączności w Warszawie (od 1998), zastępca dyrektora ds. naukowych w IŁ (2002–2006); członek Sekcji Optoelektroniki Komitetu Elektroniki i Telekomunikacji Polskiej Akademii Nauk, Polskiego Komitetu Optoelektroniki Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Optical Society of America, SPIE oraz IEEE; autor lub współautor ok. 300 publikacji (w tym ok. 100 z tzw. listy filadelfijskiej); redaktor naczelny anglojęzycznego kwartalnika *Journal of Telecommunications and Information Technology* oraz członek Rady Programowej wielu czasopism, m.in. pisma *Telekomunikacja i Techniki Informacyjne*; zainteresowania naukowe: lasery, fotonika, optyka nieliniowa, optoelektronika zintegrowana i kryształy fotoniczne.
e-mail: P.Szczepanski@itl.waw.pl lub P.Szczepanski@elka.pw.edu.pl